

大型望遠鏡を用いた木星可視オーロラの  
イメージング

Ground-based telescopic observations of  
Jupiter's visible aurora

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻  
惑星大気物理学研究室

原山 洋平

Harayama Yohei

31 January 2002

## 要旨

木星は強い磁場を持っており、この磁場に伴い巨大な磁気圏を有している。磁気圏に存在する高エネルギーの電子やイオンなどが木星電離圏・大気圏に降り込み、木星大気の原因、分子を励起することによって木星オーロラが発生している。そのため木星オーロラのダイナミクスを観測・研究することで木星磁気圏さらには惑星磁気圏における諸物理現象の理解を深めることができる。木星オーロラは、Galileo 探査機、Hubble 宇宙望遠鏡、地上の大型赤外望遠鏡などにより、紫外、赤外、可視領域での観測が行われてきた。しかし、可視領域については太陽光の木星大気表面反射が大きく十分な S/N を得ることが難しい。可視オーロラは Galileo 探査機による木星夜側の短時間の観測のみであり、地上観測による連続的な観測は行われていない。本研究では木星可視オーロラの初の地上観測を行った。

Galileo 探査機による木星夜側の可視オーロラ観測から、発光粒子は H (Balmer 系列) で、発光は主に  $H\alpha$  656.3 nm であることが分かっている。本研究では始めに、この Galileo 探査機の観測から可視オーロラを見積もり、高速高感度 CCD カメラと狭帯域干渉フィルターを用いた可視光観測システムを設計・開発した。観測は、北海道陸別町の「銀河の森天文台」の口径 115 cm 反射望遠鏡、東北大学附属飯館観測所の口径 60 cm 反射望遠鏡、さらには北海道大学理学部屋上にて口径 10 cm 小型望遠鏡を用いて、1999 年 11 月から 2001 年 11 月まで 3 シーズンに渡り行ってきた。また、水素ランプを用いて干渉縞 (フリッジ) を撮像することにより観測波長域の異なるデータを撮像し、その画像を減算処理して、観測波長を検出するという新しい観測・解析手法を開発した。

これまでに、陸別観測所、飯館観測所において多くの観測を行い、数種類の干渉フィルターを用いて異なる波長域で木星画像を取得した。本論文では、2000 年 10 月 29 日から 1 日未明にかけて飯館観測所において観測したデータの解析についてその結果を紹介する。この観測では二日間、明け方近くに非常に大気の安定した状態があり、シーイングの非常に良いデータを得ることができたためである。観測波長である  $H\alpha$  (656.3 nm) 画像から、木星の太陽光反射であるバックグラウンド画像を差し引き処理することによって可視オーロラ光を検出する。露出時間の短い画像を重ね合わせることにより、大気の揺らぎによる影響の少ない画像を作るといった画像処理プログラムを構築し処理を行った。その結果、木星北極域において可視オーロラ光と考えられる発光を検出した。この発光は見積もりから期待される強度よりも弱く、磁場モデルにより予想されるオーロラオーバルの位置と比較して、広がった構造を示している。これは地上観測の空間分解能の限界による影響もあるが、今後画像処理プログラムを改良し、より精度の高い解析を行うことによって、さらに詳細な木星可視オーロラ光の検出が可能であると考えられる。

解析手法は、露出時間の短い複数の画像から位置を正確に合わせて重ね合わせることによって明るい画像を作り、微弱な発光を検出するという今回の画像処理手法は、本研究の対象である木星可視オーロラ以外にも、惑星大気やその他微弱な発光を捕らえるようなさまざまな観測対象にも応用できるものだと考えている。

# 目次

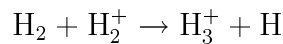
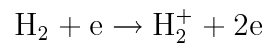
<b>1</b>	<b>序章</b>	<b>1</b>
1.1	木星オーロラ	1
1.2	木星オーロラの観測	2
1.2.1	紫外観測	2
1.2.2	赤外観測	3
1.2.3	可視観測	4
1.3	本研究の目的	5
<b>2</b>	<b>観測システム</b>	<b>6</b>
2.1	光学系	6
2.1.1	干渉フィルター	6
2.1.2	CCD カメラ	9
2.1.3	望遠鏡	9
2.2	フリッジの発生	12
2.3	可視オーロラの見積もり	13
2.3.1	オーロラオーバルの明るさと空間的広がり	13
2.3.2	木星大気による太陽光散乱	14
2.3.3	CCD カメラの感度	14
<b>3</b>	<b>観測</b>	<b>16</b>
3.1	観測日時・場所	16
3.2	観測手順	18
3.2.1	セットアップ	18
3.2.2	撮像方法	19
<b>4</b>	<b>解析</b>	<b>21</b>
4.1	解析の方針	21
4.2	処理手順	21
<b>5</b>	<b>結果と考察</b>	<b>23</b>
5.1	処理結果	23
5.2	考察	29
5.3	今後の課題	30
<b>6</b>	<b>まとめ</b>	<b>32</b>

# 1 序章

## 1.1 木星オーロラ

木星は強い固有の磁場を持っており、地球と比較して約 2 万倍もの強さがある。この強い磁場に伴い木星は巨大な磁気圏を有している。木星磁気圏に存在する高エネルギーをの電子やイオンなどが木星電離圏・大気圏に降り込んできて、木星大気の原子分子、主に水素原子や水素分子を励起することによって木星オーロラが発生する。高エネルギー衝突による直接励起で、紫外領域や可視領域の放射が発生する。発光粒子は紫外領域では H (Ly $\alpha$  121.6 nm) および H<sub>2</sub>(Lyman, Werner バンド)、可視領域では H (Balmer 系列) で主に H $\alpha$  656.3 nm である。

赤外領域では H<sub>3</sub><sup>+</sup> による回転振動輝線 3-4  $\mu\text{m}$  がある。H<sub>3</sub><sup>+</sup> は電離圏領域において次のプロセスで生成する。



また、本研究では H $\alpha$  による可視オーロラの観測を行う。水素原子の発光スペクトルの中で H $\alpha$  は、Balmer の発見した線スペクトル波長の実験式 ( $\lambda$  はスペクトル線の波長,  $R$  は Rydberg 定数)

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n}\right)$$

$$n = 3, 4, 5 \dots$$

において  $n = 3$  の時、つまり  $n$  が 3 から 2 にエネルギー状態が変化したときに放射する光である。

木星オーロラは、紫外から赤外領域に広がる発光があり、発光の空間領域はほぼ同じと考えられている。発光 1 つはメインオーバルである。メインオーバルは、木星の強大な磁場と速い自転が荷電粒子にエネルギーを与え加速するために発生しており、地球のように太陽風の影響はほとんどなく、木星の自転とともにオーバルも自転している。2 つめの発光領域は polar cap 領域であり、メインオーバル内の極側の領域での放射である。これは木星磁気圏遠方に由来しており、太陽風の影響が多少あると考えられている。3 つめはイオフットプリントである。イオの軌道 ( $6 R_J$ ) に由来しており、イオの火山活動によって木星磁気圏に放出された硫黄イオンや酸素イオンによる発光が存在している。また北磁極は自転軸の北極に対して約  $10^\circ$  ほど傾いているため北極のメインオーバルはどの観測波長においてもだいたい磁気経度  $170^\circ$  (System III) 付近で最も赤道側に膨らんでおり、地球から観測するのに適している。

## 1.2 木星オーロラの観測

### 1.2.1 紫外観測

初期の観測は Voyager 探査機の Ultraviolet Spectrometer (UVS) が紫外放射の観測に成功し、発光は主として電子やイオンによって励起された H (Ly $\alpha$  121.6 nm) および H<sub>2</sub> (Lyman, Werner バンド) によるものと理解されている。その後、Gaileo 探査機の Ultraviolet Spectrometer (UVS), Extreme ultraviolet spectrometer (EUVS) による観測や、Hubble 宇宙望遠鏡 (HST) の Wide-Field Planetary Camera 2 (WFPC2) による観測が行われている。また、Waite et al.(2001) によると、1999 年 9 月 21 日に行われた HST の Space Telescope Imaging Spectrograph (STIS) による UV 観測から、オーロラオーバルより極側の polar cap オーロラの明るさが 70 秒間に 30 倍にも増加し、最大で 37 MR となったオーロラフレア現象が確認された (図 3)。このフレアは System III 167°, 63°N のポイントから始まり、フレア領域を磁力線にそって木星磁気圏内に投影すると木星磁気圏昼側の 40-60 R<sub>J</sub> にあたる。そのためこれは太陽風の変化に直接関係している現象であり、太陽風の影響を受ける地球のオーロラと似た物理現象であると考えられている。メインオーバルは平均 30 R<sub>J</sub> に位置している。

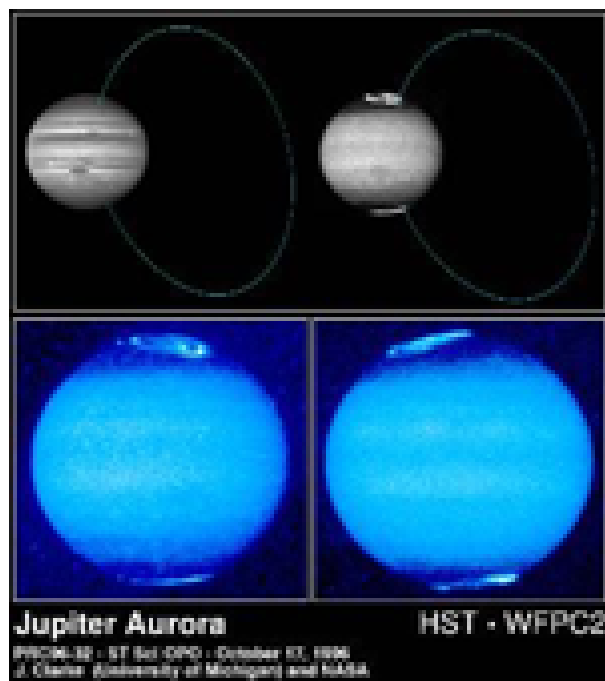


図 1: HST の WFPC2 が捕らえた紫外オーロラ [<http://www.jpl.nasa.gov/galileo/>].

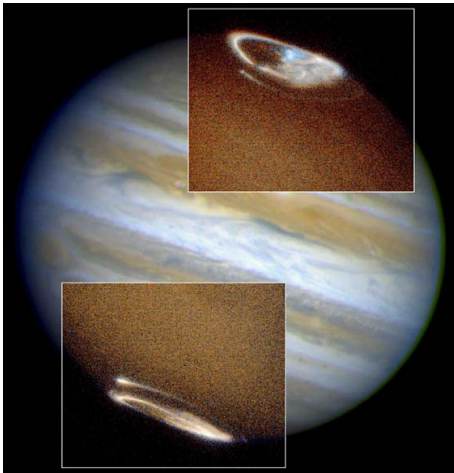


図 2: HST の STIS が捕らえた紫外オーロラの擬似カラー画像 [<http://opposite.stsci.edu/pubinfo/1998.html>].

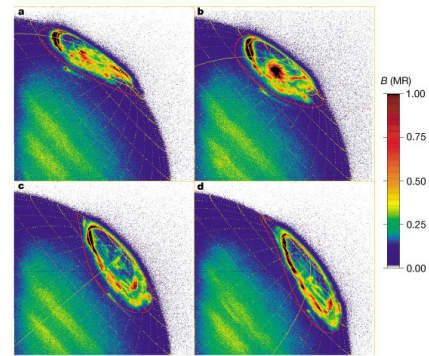


図 3: HST の STIS が捕らえた紫外オーロラフレア [Waite et al, 2001].

### 1.2.2 赤外観測

1980年代から、地上の大型望遠鏡を用いた近赤外でのイメージングが盛んに行われている。観測波長は、メタンやアンモニアの吸収によって太陽光反射が弱められている  $2\text{--}8\ \mu\text{m}$  が用いられている。Drossart et al.(1989)によると、Voyager 探査機の Ultraviolet Spectrometer (UVS) による観測から木星磁気圏において、おそらく木星電離圏起源の  $\text{H}_3^+$  が観測された。その後、Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT) によって木星南極オーロラ領域に  $\text{H}_3^+$  を観測した。その後この 10 年ほど、 $\text{H}_3^+$  による  $3\text{--}4\ \mu\text{m}$  の観測がさかに行われている。NASA の Infrared Telescope Facility (IRTF) の  $3\ \text{m}$  赤外望遠鏡を用いて ProtoCAM infrared camera による観測が行われ、大気上層部で励起された  $\text{H}_3^+$  による放射が観測されている。現在も IRTF の NSFCAM による観測が続いており、磁場モデルから発光源の分布が調べられている (図 4)。平均的にはメインオーバルが  $8\text{--}30\ R_J$ , polar cap が  $30\ R_J$  に位置する。また、Baron et al.(1996)によると、Ulysses 探査機による観測から、オーロラオーバル全体の光量が数日のタイムスケールで変動し、太陽風動圧変動と正の相関があることが分かっている。しかしこの相関はそれほど強いものではなく、木星オーロラは太陽風のような外的要因よりも主に木星自身の自転によるエネルギーがオーロラ粒子を加速させて起こると考えられている。また、IRTF の他では南米チリにある European Southern Observatory (ESO) においても、シューメーカー・レービー彗星の木星衝突後の 1994 年 7 月 22 日から 24 日にかけて、ファブリペロー干渉計を用いた近赤外カメラ IRAC-2b によって  $2.2\ \text{m}$  望遠鏡での観測が行われ、 $\text{H}_3^+$  による  $2.093\ \mu\text{m}$ ,  $\text{H}_2$  による  $2.121\ \mu\text{m}$  のエミッションが捕らえられている [Mai and Jockers, 2000]。また、ESO では 2000 年 11 月に、Very Large Telescope (VLT) の Infrared Spectrometer And Array Camera (ISAAC) を用いて数種類の赤外フィルターでの観測が行われ、 $2\text{--}4\ \mu\text{m}$  で  $\text{H}_3^+$  エミッションが観測されている (図 5)。

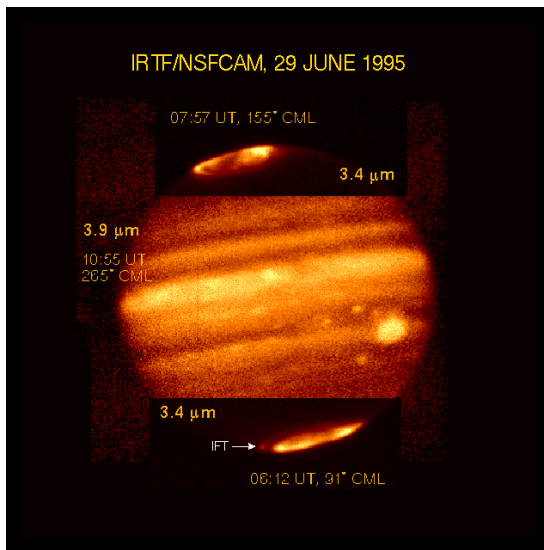


図 4: IRTF 望遠鏡が捕らえた赤外オーロラ [T. Satoh and J. E. P. Connerney, 1999].



図 5: ESO の VLT が捕らえた赤外オーロラ. 3.5-4.0  $\mu\text{m}$  フィルター使用 [<http://www.eso.org/outreach/press-rel/>].

### 1.2.3 可視観測

可視オーロラの観測は、探査機もしくは宇宙望遠鏡によるものが主である。初期観測として、Hunter (1969) は、1967 年と 1969 年に  $\text{H}\alpha$  のファブリペローエタロンを用いて 16 inch 望遠鏡による木星オーロラの観測を行った、また Clary and Hunter (1975) と Holman and Hunter (1977) は、1972 年と 1975 年に、南フロリダにおいて 26 inch 望遠鏡を用いて  $\text{H}\alpha$  オーロラの観測を行ったが、これらの観測はオーロラ光の検出にはいたっておらず、はっきりした結果も残っていない。その後、Voyager 探査機による観測が行われた。Cook et al.(1981) によると、木星夜側の観測されたリムでの発光の一つはイオ・トーラスから降り込んでくる粒子によるものであると考えた、観測した発光は波長域 400-600 nm で Total 20 kR であったが、これは観測地点から斜めに観測したため実際の強度は約 5 KR であった。また最近になって Galileo 探査機による観測が行われた。Ingersoll et al.(1998) は、1996 年から 1997 年にかけて行われた Galileo 探査機の Solid State Imaging camera (SSI) による木星夜側での観測において、可視光オーロラ強度やオーバルの形態を見積もった。その結果、オーロラの強度は約 80-300 kR で、オーバル幅は 500-8000 km, System III 150-190° において最も赤道側に降りており、メインオーバルは 9.5-15  $R_J$  (平均 13  $R_J$ ) 付近に位置している。また、Vasavada et al.(1999) は、4 つのタイプのオーロラエミッションを発見した。1 つは磁気圏の中間から外側に由来する primary arc, 2 つめはイオトーラスに由来する secondary arc, 3 つめは polar cap エミッション, 4 つめはイオフットプリントである。primary arc の幅は 170-460 km, 明るさは平均 1.3 MR, 最大で約 6.6 MR と計算された。可視オーロラは主に水素原子の Balmer 系列の放射と、水素分子の放射によるものであると考えられている。

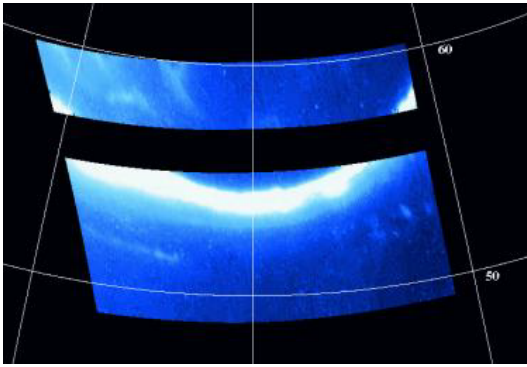


図 6: 夜側可視オーロラ [Ingersoll et al.,1998].

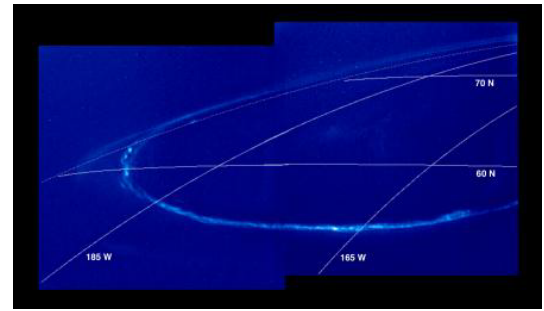


図 7: 夜側可視オーロラ [Vasavada et al.,1999].

### 1.3 本研究の目的

地球の極域に繰り広げられるオーロラ現象は、地球磁気圏で起こっている多種多様な電磁気現象が磁気圏に投影された現象である。そのダイナミクスを観測・研究することで、プラズマで満たされた磁気圏の構造やエネルギーの発生・輸送のメカニズムを、さらには磁気圏と中性大気の激しい相互作用について多くの知見を得た。

最近の探査機や宇宙望遠鏡による観測から、太陽系の多くの惑星についてもオーロラ現象の存在が明らかになった。さきに見たように、木星オーロラについても Galileo 探査機、Hubble 宇宙望遠鏡、地上の大型赤外望遠鏡などにより、紫外、可視、赤外領域での観測が行われており、惑星オーロラの構造や発光機構の解明が進みつつある。しかし、可視領域については太陽光の木星大気表面反射が大きく十分な S/N を得ることが難しい。Galileo 探査機による木星夜側の短時間の観測しかなく、連続的な観測は行われていない。そのため本研究では、地上望遠鏡を用いた木星可視オーロラ観測のための観測システムを設計・製作した。観測データの解析を行い、木星可視オーロラの検出を試みる。そして最終的には連続的なモニタリング観測を行うことによって、時間変動を含めた木星オーロラ現象の解明と、木星磁気圏さらには惑星磁気圏における諸物理現象の理解を深める、というのが目的である。



## 2 観測システム

### 2.1 光学系

観測システムは背面照射型 CCD カメラとコントローラ、狭帯域干渉フィルター、レンズからなる可視光センサーである。光学系はテレセントリック光学系と呼ばれるもので、1 枚目のコリメーターレンズで望遠鏡からの像をコリメートして平行光線を得て、それを  $H\alpha$  干渉フィルターに通し、2 枚目のフォーカシングレンズで CCD カメラの画素面上に結像させる (図 8)。木星オーロラ観測ではコリメーターレンズ・フォーカシングレンズの焦点距離は、使用する望遠鏡によりそれぞれ異なっており、陸別望遠鏡では 40 mm と 80 mm、飯館望遠鏡では 80 mm と 40 mm、小型望遠鏡では 40 mm と 200 mm である。また、この光学系は干渉フィルターとレンズを換えることで、さまざまな波長域での惑星観測を対象可能なものとしている。

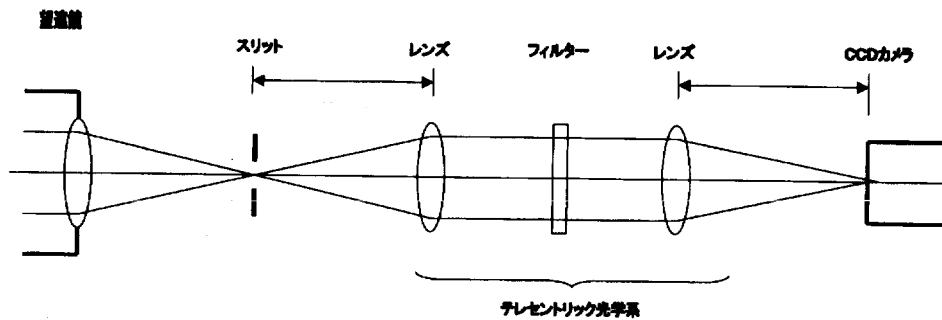


図 8: 製作した光学系。左から順に望遠鏡, スリット, レンズ, 干渉フィルター, レンズ, CCD カメラと並んでいる。

#### 2.1.1 干渉フィルター

干渉フィルターは、薄膜の透過光による干渉を利用し、平行平板ガラス面上に誘電物質の膜をスペーサーとして分離した 2 つの反射膜をつけることによって作られる。本研究では木星可視オーロラの  $H\alpha$  光が観測波長であり、 $H\alpha$  干渉フィルターは中心波長 656.9 nm、半値幅 Full Width at Half Maximum (FWHM) 0.15 nm, 0.12 nm, 0.33 nm, 1.55 nm の 4 つの狭帯域干渉フィルターを用意し、異なる観測条件で観測を行った。なお、今回解析しているデータは主に FWHM 0.15 nm と 1.55 nm の 2 つのフィルターを使用した木星画像データである。これらのフィルターの透過特性を図 9, 10, 11, 12 に示す。また、本研究の観測システムは木星オーロラ観測以外にもさまざま惑星観測を行うことができるシステムである。そのために、干渉フィルターも  $H\alpha$  以外に、木星の雲模様を見るメタンの吸収線 757.8 nm, 890.9 nm, アンモニアの吸収線 619.9 nm, ヘイズを見る 410.6 nm, 金星の雲模様を見る  $1\ \mu\text{m}$  なども用意しており、将来的にはこれらの観測も可能である。

## Hi-Technology Trading, Inc.

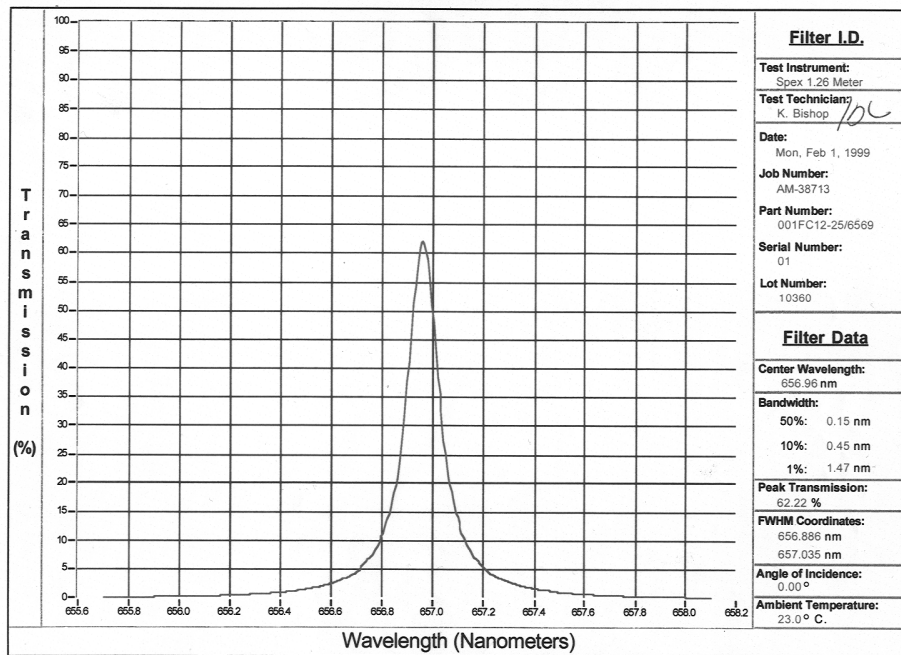


図 9: FWHM 0.15 nm フィルターの透過特性.

## Hi-Technology Trading, Inc.

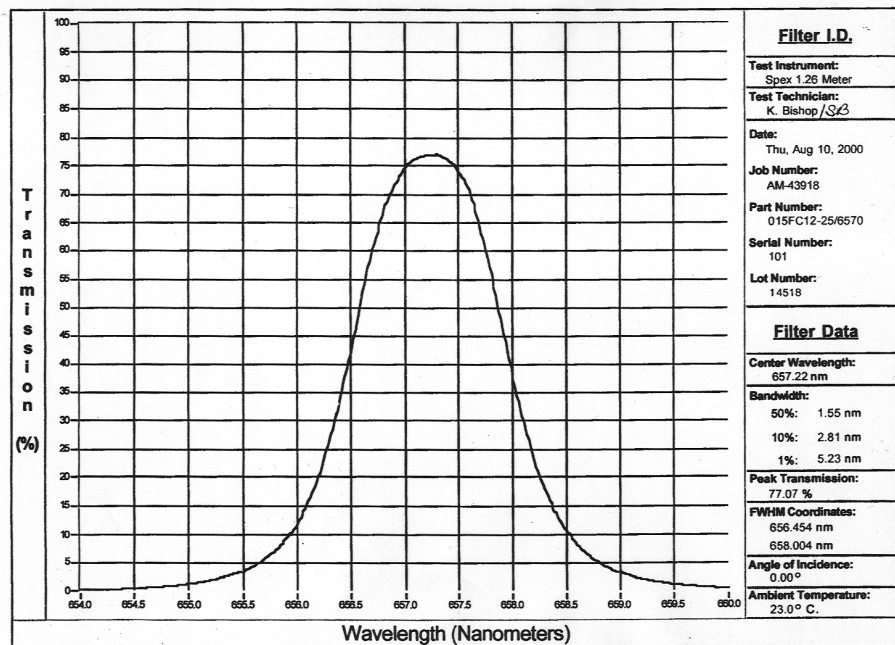


図 10: FWHM 1.55 nm フィルターの透過特性.

## Hi-Technology Trading, Inc.

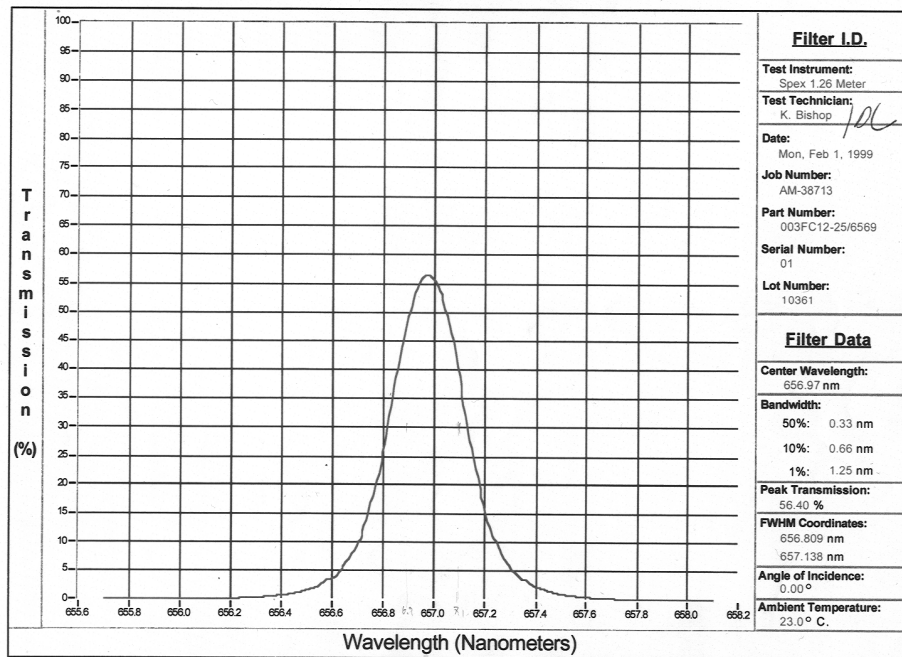


図 11: FWHM 0.33 nm フィルターの透過特性.

## Hi-Technology Trading, Inc.

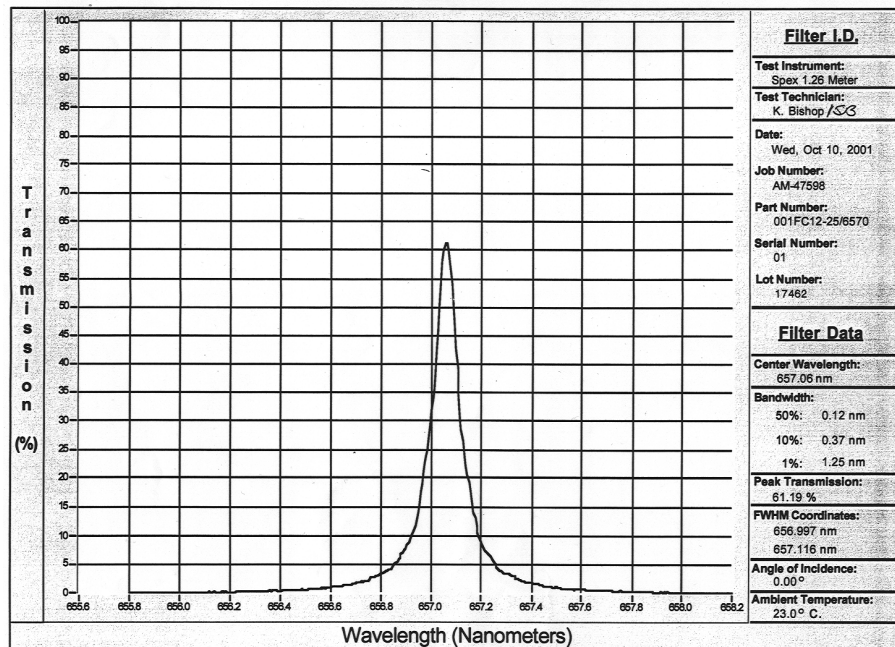


図 12: FWHM 0.12 nm フィルターの透過特性.

### 2.1.2 CCD カメラ

Pixel Vision 社の Spectra Video と Pluto を使用した。これらはともに光を前面のポリシリコンゲート電極を通さず、背面を通して照射させ電荷を集める背面照射型で、観測波長域で量子効率 85 % 以上の高感度カメラである。また、熱により発生する暗電流により生じるノイズを抑えるために、CCD センサの冷却に 2 段ペルチェ素子を用いて冷却しており、Spectra Video では室温より約 45 °C ほど冷却可能な低暗電流カメラである。Pluto は毎秒十数フレーム撮像可能な高速カメラで、Spectro Video に比べて読み出しノイズは増すが、短時間でより多くの木星画像を撮像することができる。それぞれの特徴を以下に示す。

- Spectro Video

- 画素数: 512 × 512
- ピクセルサイズ: 24  $\mu\text{m}$  × 24  $\mu\text{m}$
- ゲイン Low/High: 8.61/1.85 (electrons/DN)
- 読み出しノイズ: typical 7 electrons (at 50 k pix/sec)
- 暗電流: 1 electron/pixel/sec (at - 45 °C)
- 冷却: 2 段ペルチェ (室温 - 45 °C)
- AD 変換: 16 bit

- Pluto

- 画素数: 625 × 488
- ピクセルサイズ: 12  $\mu\text{m}$  × 12  $\mu\text{m}$
- ゲイン Low/High: typical 4.5/1.2 (electrons/DN)
- 読み出しノイズ: 25/30 electrons RMS (Lo/High)
- 暗電流: 20 electron/pixel/frame (at - 5 °C)
- 冷却: 2 段ペルチェ (室温 - 40 °C)
- AD 変換: 14 bit

### 2.1.3 望遠鏡

北海道陸別町の「銀河の森天文台」にある口径 115 cm 反射望遠鏡 (図 13) と、東北大学附属飯館観測所にある口径 60 cm 反射望遠鏡 (図 15) を用いた。また、北海道大学理学部屋上において、口径 10 cm 小型望遠鏡 (図 17 参照) を用いて観測作業手順の確認およびデータ取得を行った。観測システムは、陸別望遠鏡ではナスミス焦点に設置し観測を行い (図 14)、飯館望遠鏡ではクーデ焦点に設置し観測を行った (図 16)。また小型望遠鏡では図 (18) のように設置し観測を行った。各望遠鏡の特徴を以下に示す。

- 陸別 115 cm 反射望遠鏡
  - 有効口径: 110 cm
  - 焦点距離: 8800 mm (ナスミス焦点)
  - 架台: 経緯台
  
- 飯館 60 cm 反射望遠鏡
  - 有効口径: 60 cm
  - 焦点距離: 14400 mm (クーデ焦点)
  - 架台: 赤道儀
  
- 10 cm 屈折望遠鏡
  - 有効口径: 105 mm
  - 焦点距離: 820 mm
  - 架台: 赤道儀



図 13: 陸別「銀河の森天文台」の口径 115 cm 反射望遠鏡.

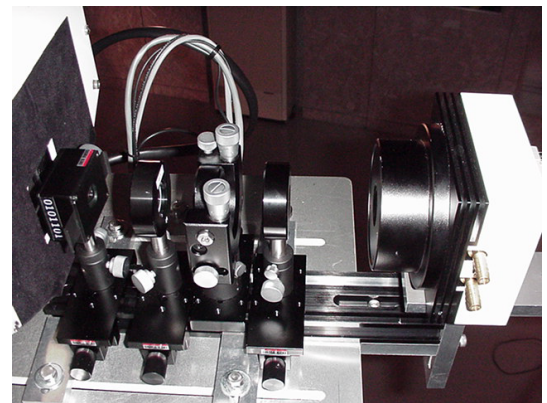


図 14: ナスミス焦点架台部に設置した光学系.



図 15: 飯館観測所の 60 cm 反射望遠鏡.



図 16: クーデ焦点に設置した光学系.

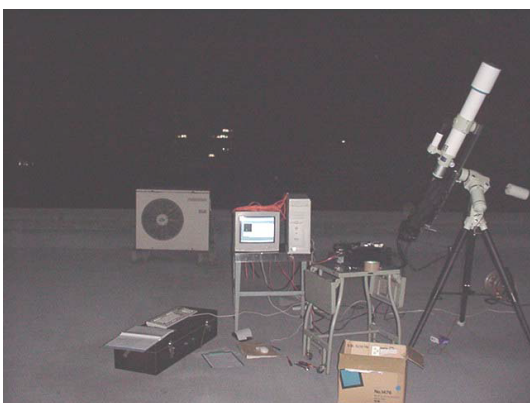


図 17: 口径 10 cm 小型望遠鏡を用いた観測.

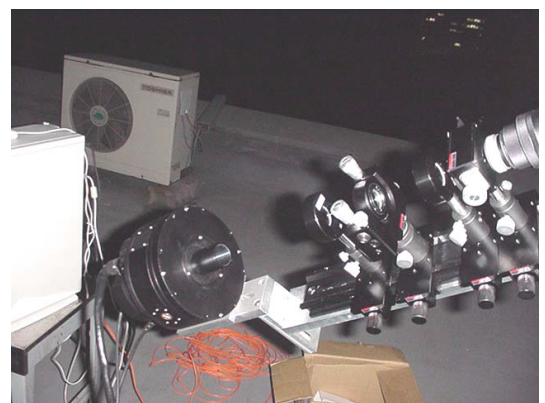


図 18: 小型望遠鏡に取り付けた光学系.

## 2.2 フリンジの発生

観測に用いた干渉フィルターの透過特性は、温度と角度に対して依存性を持っている。温度係数は約  $0.02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  であり、温度が低くなると透過波長は短波長側にシフトする。また干渉フィルターに対して角度  $\theta$  傾いた時の光の透過波長  $\lambda$  は、もとの透過波長を  $\lambda_0$ 、フィルターの屈折率を  $n$  (2.05)、空気の屈折率を 1.00 とすると、

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{1 - \left(\frac{1}{n}\right)^2 \sin^2 \theta}$$

と表され、短波長側にシフトする。またそのように角度を持つ場合、透過曲線のピークは下がり、すそ野が広がるという特性を持つ。したがって観測時の気温やフィルターの取り付けによって透過波長は変化する。狭帯域の干渉フィルターを用いた場合、CCD チップ上では異なる透過波長を受けていることになり、ある波長に注目するとフリンジ（干渉縞）という形で現れることになる。そこで、水素ランプを用いて観測波長である  $\text{H}\alpha$  光が CCD チップ上のどこで検出しているのかを測定する必要がある。具体的には図 19 のように、望遠鏡の焦点部においたスクリーンを一様に水素ランプで照らし、その画像を撮像すると、スクリーン上である角度を持った領域からの光のみが干渉フィルターを透過し、CCD に検出される。言い換えればその領域のみが  $\text{H}\alpha$  光を透過しているということになる。木星撮像時にオーロラ領域である木星の両極域をそこに導入して撮像する必要がある。実際に撮像したフリンジ画像を図 20 と図 21 に示す。図 20 は陸別観測において FWHM  $0.15 \text{ nm}$  のフィルターによるフリンジを Spectra Video で撮像したもので、輪の幅が細い。一方、図 21 は飯館観測において FWHM  $1.5 \text{ nm}$  のフィルターによるフリンジで Pluto で撮像したもので、輪の幅が太く、さらに光学系の拡大率が異なるためにフリンジの一部を撮像したものになっている。

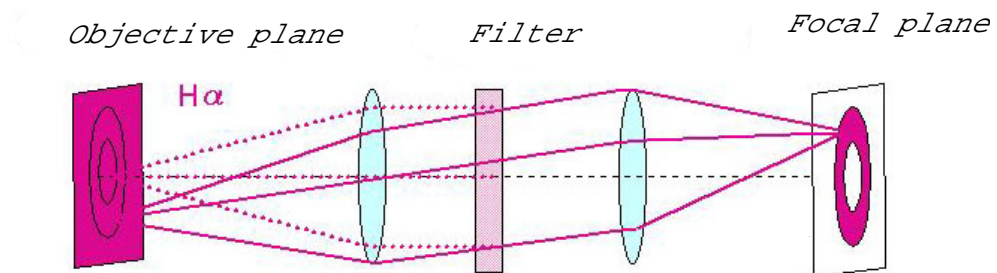


図 19: フリンジ発生のしくみ。フィルターを設置する傾きと、周りの温度は観測によってことなり、 $\text{H}\alpha$  光で一様に照らしたスクリーン上からフィルターに入射する光の中で、その時の干渉条件にあった角度を持つ領域のみが透過し、CCD 画素上に結像する。

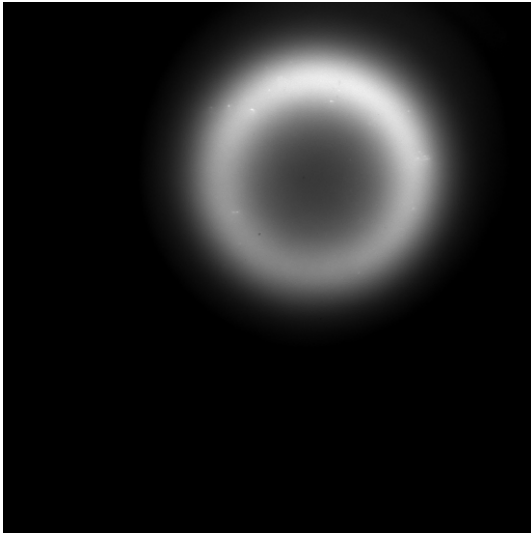


図 20: FWHM 0.15 nm フィルターのフリンジ.

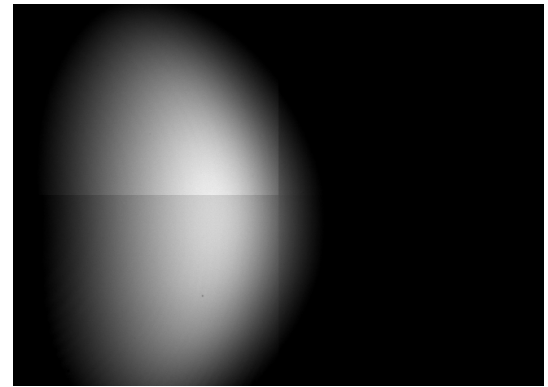


図 21: FWHM 1.5 nm フィルターのフリンジ.

## 2.3 可視オーロラの見積もり

これまでに報告されている木星可視オーロラ観測から、陸別望遠鏡と飯館望遠鏡を用いた本研究の観測システムにおいて木星可視オーロラ検出の見積もりを行った。

### 2.3.1 オーロラオーバルの明るさと空間的広がり

Galileo 探査機による木星夜側の可視オーロラ観測から、その明るさやオーバル幅が見積もられている。Ingersoll et al.(1998) によると、北極オーロラオーバルの明るさは時間変化しており、Clear filter(385-935 nm) で Total 80-300 kR であった。また、Total 80 kR の時に Red(625-705 nm) で 30 kR であり、これは  $H\alpha$  光によるものと考えられる。そのため Total の 30 % 以上が  $H\alpha$  であると推測される。即ち、 $H\alpha$  オーロラとして 15-90 kR 以上であると期待される。しかし Vasavada et al.(1999) によると、primary arc の平均的な明るさは約 1.3 MR であり、探査機の軌道により SSI カメラが木星リムの接線方向を捕らえた最も明るいもので約 6.6 MR であった。その場合、30 % 以上が  $H\alpha$  光であると考えると平均的に  $H\alpha$  光は 400-500 kR ほどであると考えられる。また、Hubble 望遠鏡による UV 観測から確認されたフレア現象 [Waite et al.,2001] のような現象が、可視光領域においても発生している可能性もあり、可視オーロラの明るさは変動していると考えられる。したがって、 $H\alpha$  オーロラは少なく見積もると数十 kR、大きい場合は数 MR にもなるであろう。次にオーロラオーバルの幅を考える。Ingersoll et al.(1998) では、オーバルの幅は Full Width で 500-8000 km と見積もっているが、Vasavada et al.(1999) の詳細な解析ではその FWHM (半値幅) は 170-460 km と考えている。

衝前後の観測時の木星視直径を  $47''$  とすると、陸別観測と飯館観測での観測システムの分解能はそれぞれ約  $0.28''/\text{pixel}$ 、約  $0.34''/\text{pixel}$  となり、木星面上では 1000 km 前後になる。これをオーロラオーバルの幅であると考え、これはオーロラオーバルの空間スケール



ルに比べてやや大きめである。そこで今、オーロラの明るさを、光子の量の帳尻をあわせるという意味で、先に示したオーバルの強度のなかで小さく見積もって 100 kR であるとする。

### 2.3.2 木星大気による太陽光散乱

次に、バックグラウンド光を検討する。木星可視オーロラの強度と木星の太陽光反射であるバックグラウンド光の強度との比  $S/N$  を考える。木星面における太陽光反射の連続光はおよそ 5 MR/0.1 nm である。先の可視オーロラの明るさ 100 kR を用いて FWHM 0.15 nm フィルターでは約 7.5 MR となり  $S/N$  は 100 kR/ 7.5 MR で約 1.3 %、FWHM 1.55 nm フィルターでは約 77.5 MR となり  $S/N$  は約 0.13 % となる。しかし実際には、観測波長である 656.3 nm の  $H\alpha$  エミッションは太陽大気のフラウンホファー吸収線内にあるためにまわりの連続光の 25 % ほどに減光しており、また、木星の太陽光反射はオーロラ領域であるディスクの端に行くほど小さくなるなどの影響を考慮すると、実際の 656.3 nm 近傍でのバックグラウンド光はかなり落ちていていると考えられる。そこでバックグラウンド光は 1/10 落ちていていると考えて 500 kR/0.1 nm であるとする、FWHM 0.15 nm フィルターでは約 750 kR となり、FWHM 1.55 nm フィルターでは約 7.75 MR となる。

### 2.3.3 CCD カメラの感度

先に見たように、可視オーロラの明るさを 100 kR、幅を 1000 km、極域でのバックグラウンド光を 500 kR/0.1 nm として、今回の観測システムにおける CCD カメラでの検出をされる値を検討する。

まず始めに CCD で検出される値について考える。今回用いている明るさの単位レーリー (R) 値はオーロラや大気光のような微弱な発光の強度を測る単位である。測光学的定義は、ある観測点で (ある方角からの) 放射強度 ( $\text{photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sterad}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$ ) に  $4\pi/(10^6)$  かけた値がレーリーである。すなわち、

$$1\text{R} \leftrightarrow \frac{10^6}{4\pi} \text{photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sterad}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$$

となる。ここで、明るさ  $I$  R の時、望遠鏡の鏡、もしくはレンズの有効面積を  $A$  ( $\text{cm}^2$ )、CCD 1 pixel に相当する立体角を  $\omega$  とすると、観測されるフォトン数は、

$$\text{Photons} = \frac{10^6}{4\pi} \times I \times A \times \omega$$

となる。先に見たそれぞれの干渉フィルターの透過率、CCD カメラの量子効率をかけたものが CCD 1 pixel に入射するフォトン数となり、これをゲイン数で割った値が 1 pixel 当たりのカウント数となる。ただし、実際にはこれにカメラの暗電流ノイズとリードアウトノイズを加えたものが明るさとして検出される。

そこで、陸別観測の場合を考えてみる。明るさ 100 kR のオーロラを露出  $t$  秒撮ると、FWHM 0.15 nm フィルター用いた場合の透過率は約 60 % (図 9)、CCD カメラの量子効率は 85 %、ゲイン (High) は 1.85 (electrons/DN) であり、検出される値は約  $40t$  カウント

となる。暗電流は露出 1 秒以下では無視でき、リードアウトノイズで約 4 カウントほどのノイズが加わり、実際には約  $40t+4$  カウントとなる。一方、バックグラウンド光は 750 kR であるので約  $600t+4$  カウントほどである。この場合、1 秒露出では S/N は 7 % 以上となり検出は十分であると考えられるが、実際には地上観測の場合、大気のゆらぎによる影響から、分解能の限界は 1 秒角程度である。そのためこの大気の影響による限界の分解能に近づけるため、露出時間を短くして揺らぎの影響の少ない画像を数多く取得し、画像処理によりそれらを重ねあわせることによって、より鮮明な画像を得るという方法を用いる。陸別観測のシステムでは 1 pixel は約  $0.28''$  なので、オーロラの光が 4 pixel ほどに広がることになる。つまり  $1/4$  に光量が落ちたと考える。そうすると S/N は 2.3 % となる。これはこのままだでも CCD で検出可能な値であるが、実際の解析ではオーロラ光を含む木星画像と、バックグラウンド光のみを含む木星画像の減算処理を行うことによってオーロラ光を検出することになる。それゆえ比較すべきものはオーロラ光の値と、引き算した後の背景の揺らぎ成分である。CCD に関して、カウント値の統計的な揺らぎは  $\pm\sqrt{\text{カウント}}$  であり、このノイズは露出時間の短い画像を複数重ね合わせることによって相対的に小さくなる。したがって、重ね合わせることによって揺らぎの小さいバックグラウンド光を得ることができ、重ね合わせたオーロラ光画像から引き算することによって、オーロラ光が背景の揺らぎに対して増加することになる。この比が十分に大きくなるようにフレームを重ね合わせたものを処理すれば検出が可能となる。

## 3 観測

### 3.1 観測日時・場所

木星は外惑星であり、太陽、地球、木星の順で並ぶ「衝」をはさんで4ヶ月間ほどが観測シーズンである。観測の好期は「衝」の前後1ヶ月であるが、「衝」が冬の場合には気象条件により気流の影響もあるので一概には言えない。これまで観測システムの構築準備も含め、1999年11月から2001年11月まで3シーズンに渡り観測を行ってきた。1999年の「衝」は10月24日であり、初回にあたるこのシーズンは観測システムを製作し、陸別望遠鏡、飯館望遠鏡を用いてテスト観測をして観測システムのセットアップを行った。数種のフィルターを用いて、木星の他に、金星、土星についてもテスト撮像を行い、これらの観測についても将来的には可能であることを確認した。2000年の「衝」は11月28日であり、2年目にあたるこのシーズンは、 $H\alpha$  オーロラ光の検出精度を上げるために、水素ランプを用いてフリンジを撮像し、オーロラ光と木星太陽光反射とを区別するという解析方法に向けた観測を開始し、陸別、飯館、札幌の3か所で観測を行い多くの木星画像を取得した。3年目にあたる2001年のシーズンは「衝」は2002年1月1日であるが、まず始めに10月に陸別において観測を行った。この時期は陸別の天候が不安定であったが、中旬頃には比較的シーイングの良いデータが得られた。また10月末には飯館観測所において、二日間、明け方近くに非常に大気の安定した状態があり、シーイングの非常に良いデータを取得した。

これまでに行った機器調整及び観測スケジュールを表1に示す。

年月日	場所	フィルター	備考
1 シーズン目			
1999.11.28 ∧ 11.30	陸別	H $\alpha$ (0.33 nm) H $\alpha$ (0.15 nm) その他数種類	設計した光学系を取り付け, テスト撮像. その後, 木星データ取得. また, 数種類 のフィルターで, 土星, 金星をテスト撮像.
1999.12.26 ∧ 12.28	飯舘	H $\alpha$ (0.15 nm) H $\alpha$ (0.33 nm)	クーデ焦点に光学系を取り付け, テスト撮像. 水素ランプを用いて, フリンジのテスト撮像.
2000.2.27	飯舘	H $\alpha$ (0.15 nm)	フリンジ撮像し木星を撮像. 取得データ少ない.
2 シーズン目			
2000.8.27 ∧ 9.5	陸別	H $\alpha$ (0.15 nm)	メインカメラ不調のため, 予備カメラおよび 代替カメラも用いて観測, 予備データ取得. 天候不良のため取得データは少ない.
2000.10.21 2000.11.4	札幌	H $\alpha$ (0.15 nm)	小型望遠鏡をセットアップし, 観測. 両日とも シーイングは並以上で, 取得データ多い.
2000.12.4 ∧ 12.11	陸別	H $\alpha$ (0.15 nm)	天候不安定であったが, 一週間で取得データは 多い. 今後, 解析の予定.
3 シーズン目			
2001.10.3 ∧ 10.9	陸別	H $\alpha$ (0.15 nm)	天候不良が続き, セットアップのみで終了.
2001.10.15 ∧ 10.18	陸別	H $\alpha$ (0.15 nm)	観測システムは前回からセッティング済みの ため, すぐに観測を開始. 後半シーイングの 良いデータが得られた. 今後, 解析の予定.
2001.10.23 ∧ 10.26	飯舘	H $\alpha$ (1.55 nm)	FWHM 1.55 nm フィルターを用いてテスト 撮像後, 木星データ取得. シーイングは並, 取得データ多い. 現在の解析に引き続き 解析の予定.
2001.10.29 ∧ 11.1	飯舘	H $\alpha$ (1.55 nm) H $\alpha$ (0.12 nm)	シーイング最良. 観測時間がわずかである ため, データセットは少ないが, 現在データ 解析中.

表 1: これまでの観測スケジュール.

## 3.2 観測手順

### 3.2.1 セットアップ

観測システムは陸別、飯館、小型の3つの望遠鏡に取り付け可能であり、2枚のレンズを交換して倍率を変更できるようになっている。セットアップにおいて最も重要な作業は光軸調整とピント合わせである。この作業は直接データの質に影響するので、慎重に行う必要がある。光軸調整とピント合わせは次のような手順で行う。

#### 1. 光軸の大まかな導入。

レンズと CCD カメラを光学レールに対して垂直にセットする。これで光軸は大まかに CCD 画素上に導入できている。小型望遠鏡の場合は像を拡大するために焦点距離の長いレンズを使用しており光学系が長くなっているため、次のピント調整の作業と並行して行う場合もある。

#### 2. コリメーターレンズ (望遠鏡側) のおよその位置決め。

まず望遠鏡のおよその焦点面に少し開いたスリットを置く。フォーカシングレンズをはずし、CCD カメラに無限遠にピントのあったカメラレンズを取り付けて連続撮像する。コリメーターレンズを少しずつ動かし、CCD カメラにスリットがシャープに写る位置を決める。これでコリメートされた光は平行光であると確認でき、スリットとコリメーターレンズとの距離が決まる。

#### 3. フォーカシングレンズ (CCD カメラ側) の位置決め。

CCD のカメラレンズをはずし、フォーカシングレンズをセットする。フォーカシングレンズを少しずつ動かし、スリットがシャープに写る位置を決める。これで平行光を CCD 面にフォーカスしていることが確認でき、フォーカシングレンズと CCD カメラとの距離が決まる。

#### 4. 望遠鏡の焦点の調整。

スリットをはずし実際に適当な恒星を導入して連続撮像しながらコリメーターレンズを少しずつ動かし、点光源がシャープに写る位置で固定する。さらに、望遠鏡本体のピント調整で微調する。

#### 5. 光軸の調整。

最後に CCD 画素上の中央に像がくるようにレンズを左右に動かして光軸を微調し、木星を導入する。

スリットとコリメーターレンズとの距離、フォーカシングレンズと CCD カメラとの距離は固定されるので、これらの値は次回のセットアップのために控えておく。

### 3.2.2 撮像方法

撮像は主に、フリッジ画像の撮像、 $H\alpha$  フレームと Background (BG) フレームの撮像、を露出時間を変えながら繰り返し行う。適時ダークフレームやフラットフレームの撮像も行う。 $H\alpha$  フレームというのは木星のオーロラ領域である極域をフリッジの領域に導入して撮像したもの、つまりオーロラ領域を 656.3 nm 付近で撮像したものである。BG フレームとはオーロラ領域をフリッジの領域からはずして撮像したもの、つまり 656.3 nm の長波長領域もしくは短波長領域で撮像したものである。すなわち  $H\alpha$  フレームは木星ディスクにオーロラの  $H\alpha$  エミッションを含む画像であり、BG フレームはそれを含まない画像である。これは観測データの解析において  $H\alpha$  オーロラの検出に、 $H\alpha$  フレームから BG フレームの減算処理を行うためである。また、必要であれば、データ解析に画像処理のためにダークフレームやフラットフレームの撮像も行う。ダークフレームとはシャッターを開けずに撮像したフレームで、CCD の熱的なノイズにより明るさが検出されるものである。そのため、木星画像と同じ温度でのダークフレームを用いることによって、熱的なノイズを減算することができる。またフラットフレームは一様に照らされた視野を撮像することによって、CCD チップ上の感度ムラを撮像するものである。フラットフレームを割ることによって、木星画像の感度ムラを補正することができる。実際の木星撮像時は限られた時間の中でより多くの  $H\alpha$  フレームと BG フレームを撮像し、データを取得したいのだが、その中で可能な限りこれらのフレームも撮像しておくようにする。

撮像は木星の中央子午線経度 CML (Central Meridian Latitude) を計算してから行う。先に述べたように北極オーロラオーバルは System III 150-190°W において最も赤道側に膨らんでおり、地球からの観測に適している (図 22)。最も地球側に向く CML = 170° をはさんでおよそ前後 90°, すなわち 80°-260° の時間帯は主に北極域を撮像する。それ以外は北極オーロラオーバルは木星の夜側に回り、逆に南極オーロラオーバルが少し地球側に向き始めるため、南極域を撮像する。具体的な撮像手順を次に示す。

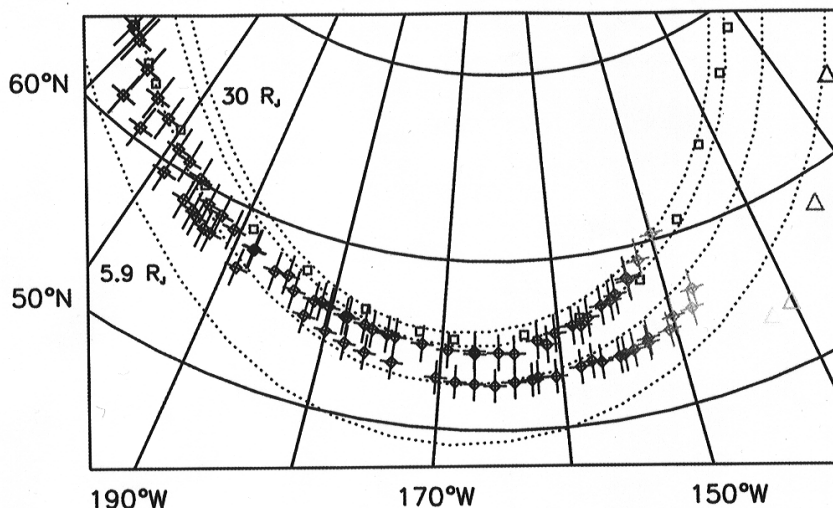


図 22: 夜中側可視オーロラメインオーバルの位置. [Vasavada et al.,1999]

- フリンジ画像の撮像.

望遠鏡の焦点面にスクリーンを設置し、そのスクリーンを水素ランプの光で一様に照らす。この際水素ランプの電源は重いため、ランプに光ファイバーを当てて、そのファイバーで光をスクリーンに導入した。そして CCD カメラを連続撮像にして、フリンジ全体もしくは一部が CCD 画素上に写るようにフィルターを左右に振って導入する。その後フィルターを固定し、フリンジ画像を数枚取得する。これによって、画素上で  $H\alpha$  光 (656.3 nm) を透過している領域がわかる。ディスプレイにテープなどでしるしを張り、画素上でのフリンジの領域が分かるようにしておく。

- $H\alpha$  フレームと BG フレームの撮像.

CML が  $80^{\circ}$ - $260^{\circ}$  であれば北極域を、それ以外であれば南極域をフリンジの領域に導入し露出時間を決めて  $H\alpha$  フレームを撮像する。露出 100 ms の画像 100 枚を Pluto であれば 1 分ほど、Spectra Video であれば 10 分弱で撮像できる。その後、木星極域をフリンジ領域からはずして BG フレームを同じ露出で撮像する。

このような作業を繰り返し行う。また干渉フィルターの温度依存について先に触れたように、気温が大きく変わるとフリンジの径が変わるので、フリンジ画像は頻繁に撮像しておく。木星極域のフリンジ領域への導入やフリンジ領域からはずす作業は、干渉フィルター自体を傾けてフリンジを移動させる方法と、望遠鏡の視野を動かして木星を移動させる方法との 2 つがある。前者の方法は  $H\alpha$  フレームと BG フレームの撮像 1 セットごとにフリンジ画像を撮像する必要があるが、飯館望遠鏡のクーデ焦点はフィルターを動かして、水素ランプをあてるという作業が容易であるためこの方法を用いた。陸別望遠鏡の場合はナスミス焦点であり、作業には脚立に登るなどの必要があるため、フリンジの位置を固定する後者の方法を用いた。

## 4 解析

本研究のファーストステップは、画像処理により木星オーロラ領域にオーロラによる発光を検出することである。水素ランプを用いてフリンジを撮像し、CCD 上でのフリンジ領域を確認して撮像した  $H\alpha$  画像と BG 画像からオーロラ光の検出を試みるというのが本研究の特徴である。表 1 に示したようにこれまでに多くの観測を行ったが、その中で最も観測条件が良くシーイングの良いデータが得られた 2000 年 10 月 29 日から 1 日未明にかけての観測データを用いて、オーロラ検出の画像処理手法の構築を目指す。

### 4.1 解析の方針

オーロラ検出の解析方法として、まず以下のような手順を考えた。

1. それぞれ 1 枚の  $H\alpha$  画像と BG 画像において、木星のオーロラ領域のプロファイルと比較し、発光の差からオーロラ光の有無を検討する。
2.  $H\alpha$  画像と BG 画像の減算処理を行い、その画像のオーロラ領域のプロファイルからオーロラ光の有無を検討する。
3. 露出時間の短い  $H\alpha$  画像と BG 画像をそれぞれ複数枚重ね合わせを行い、できた画像同士を引き算しその画像から検討する。

これまでの解析で、1, 2 による方法ではオーロラ光を確認できなかったため、3 の方法での解析を主に行った。画像の差し引きは、観測する  $H\alpha$  光がそのバックグラウンド光となる木星面太陽光反射にたいして微弱であるため、 $H\alpha$  フレームから BG フレームを引き算することによって S/N を向上させるのが目的である。また画像の重ね合わせの理由として、一つは地上観測では地球大気の揺らぎによる影響を避けられないが、露出時間の短い画像（暗いが、揺らぎによるボケも小さい）を重ね合わせることによって積分し、明るくボケの小さい画像を得るためである。またもう一つは、画像を重ね合わせることによってノイズとして効いてくる CCD の統計的な揺らぎをオーロラ光に対して相対的に減らす事ができるためである。

### 4.2 処理手順

今回解析を行った画像処理プログラムによる処理手順を以下に示す。

1.  $H\alpha$  フレーム, BG フレーム, それぞれの重ね合わせ。  
 $H\alpha$  フレームのある 1 枚を基準として、その他のフレームの木星との位置合わせを行い、すべて重ね合わせていく。また同様に、BG フレームについても 1 枚を基準として位置合わせを行い、重ね合わせていく。その際、木星ディスクの周りにも明るさがあり、この背景の値を引き算しながら重ね合わせていく。その後、それぞれ出来た画像の値を重ね合わせたフレーム数で割って、カウントをそろえる。基本的には重ね合わせる  $H\alpha$  フレームと BG フレームの数は等しいほうがよいが、観測状況によってはかならずしも同じだけ取得できるというわけではないので、その場合はフレーム数は



違ってくる.

## 2. 重ね合わせた $H\alpha$ 画像と BG 画像の位置合わせ.

1 でそれぞれの重ね合わせの基準となった  $H\alpha$  フレームと BG フレームの位置合わせを行い, 計算された変位分だけ 1 で重ね合わせた BG 画像の木星ディスクを平行移動する. この際, 観測は望遠鏡の焦点部に観測システムを置いているため, 木星ディスクは時間とともに回転する. そのため,  $H\alpha$  フレームと BG フレームの撮像の時間差の分だけ BG 画像を回転させることにより補正する.

## 3. BG 画像のファクターの決定と両画像の引き算.

$H\alpha$  画像から BG 画像を引き算する前に, BG 画像の明るさを調整する.  $H\alpha$  フレームの木星は, フラウンホファー吸収線である  $H\alpha$  光を見ているため, その近傍の波長を検出している BG フレームの方がやや明るい画像となっている. 重ね合わせた後も BG 画像の方が明るいいため, 引き算するにはファクターを掛けて明るさの調整をする必要がある. 実際, 引き算後の画像からオーロラ光を検出するためには, このファクターをかなり慎重に調整して, オーロラ光以外の背景を出来るだけ残らないように引き算する必要がある. そのため, このファクターは,  $H\alpha$  画像と BG 画像のオーロラ領域である極域のある部分を切り出して, 引き算して最も残差が少なくなるようなファクターを計算させて, それを用いて画像の引き算を行った.

また, 画像の位置合わせの際の画像同士の変位の決定は以下のように行った. 図 23 のように, 2 つの画像をずらしながらマッチングし, お互いのずれを計算した. 具体的には, 元画像  $A(x,y)$  に対し, 重ね合わせる (もしくは引き算する) 画像  $B(x,y)$  を  $x$  方向に  $k$ ,  $y$  方向に  $l$  (それぞれ  $\pm 10$  pixel 程度) だけずらしながら, その残差二乗和

$$r(k, l) = \Sigma(A(x, y) - B(x + k, y + l))^2$$

が最小となるような変位  $(k_0, l_0)$  を計算させる. その後, 画像  $B$  を平行させて足し算 (引き算) を行う. なお, BG 画像にかかるファクター決定も, この方法で行い, 最もきれいに引き算できるようなファクターを計算させている.

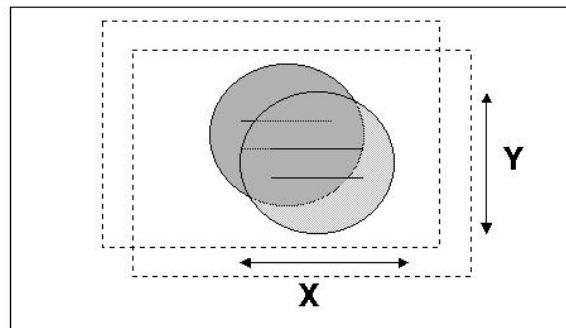


図 23: パターンマッチングの略図.

## 5 結果と考察

今回は 2000 年 10 月 29 日から 1 日未明にかけての観測データの解析を行った。以下にその処理画像について考察する。

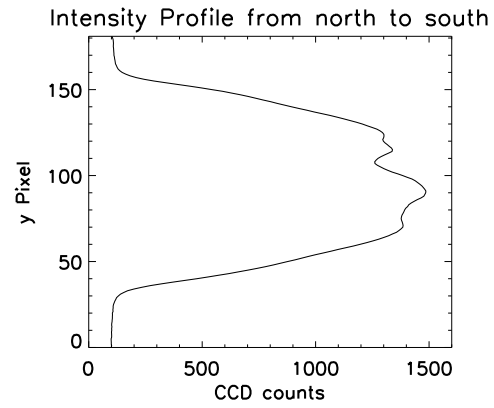
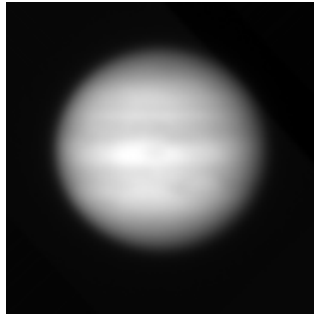
### 5.1 処理結果

2000 年 10 月 29 日から 1 日未明の観測において、FWHM 1.55 nm フィルターと FWHM 0.12 nm フィルターを用いてデータを取得した。観測時の CML は約  $160^\circ$  であり、北極オーロラオーバルは木星ディスクのほぼ中央に位置している。北極オーロラ領域の  $H\alpha$  フレームと BG フレームを連続撮像した。そのなかで、FWHM 1.55 nm フィルターを使用した露出 200 ms のデータセット ( $H\alpha$ , BG それぞれ 100 フレーム) と、露出 100 ms のデータセット (それぞれ 200 フレーム) について解析を行った。それぞれのデータセットで、重ね合わせるフレーム数を変えて画像処理した。オーロラオーバルを確認するために、木星北極域のプロファイルと比較する。露出 200 ms は図 24 が 100 フレーム、図 25 が 50 フレームの重ね合わせである。露出 100 ms では図 26 が 200 フレーム、図 27 が 100 フレーム、図 28 が 50 フレームである。図中の右側が木星画像であり、上が木星北極、下が木星南極である。また、図中の左側が木星の中央子午線付近の南北に沿った強度プロファイルであり、縦軸は CCD pixel, 横軸は CCD のカウント値である。一番上段が、重ね合わせた  $H\alpha$  画像であり、中段が重ね合わせた BG 画像、下段がそれらを引き算して得られた画像である。

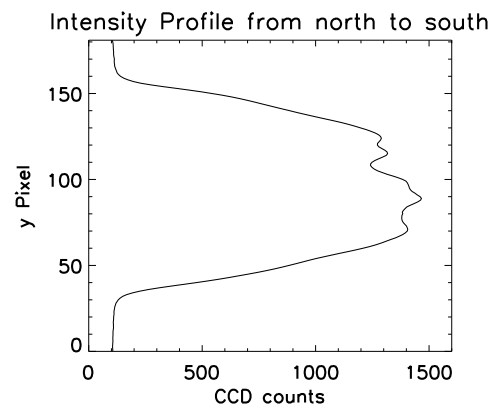
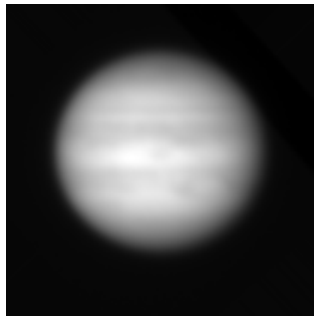
01 Nov. 2001 04:40 (CML 160 degree)

Exp. 200 ms, 100 frames (Filter FWHM 1.55 nm)

H alpha



BG (factor:0.931000)



Subtracted

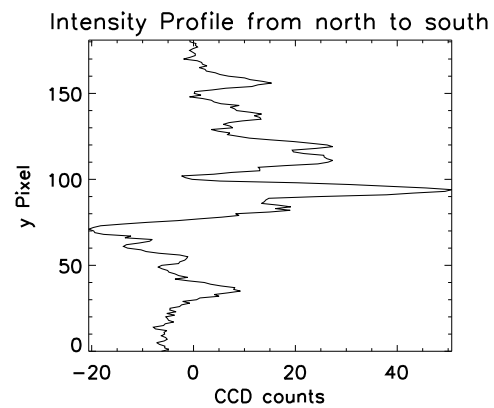
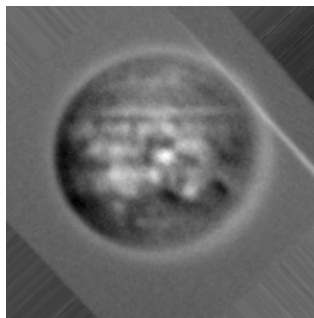
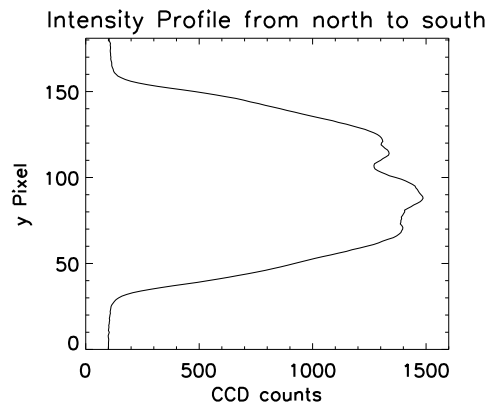
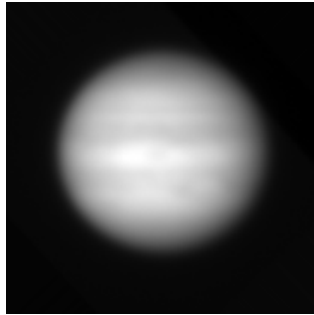


図 24: 露出 200 ms, 処理フレーム数 100. 右の木星画像は上側が北極, 左側は南北の強度プロファイルである.

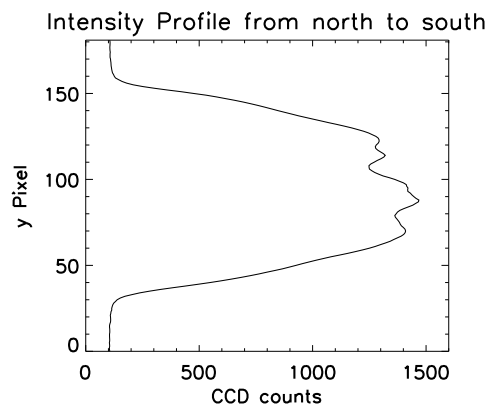
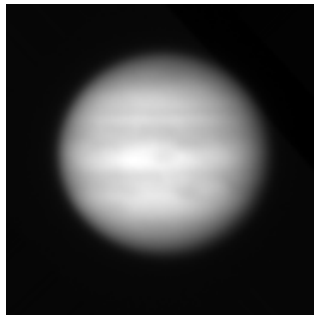
01 Nov. 2001 04:40 (CML 160 degree)

Exp. 200 ms, 50 frames (Filter FWHM 1.55 nm)

H alpha



BG (factor: 0.932000)



Subtracted

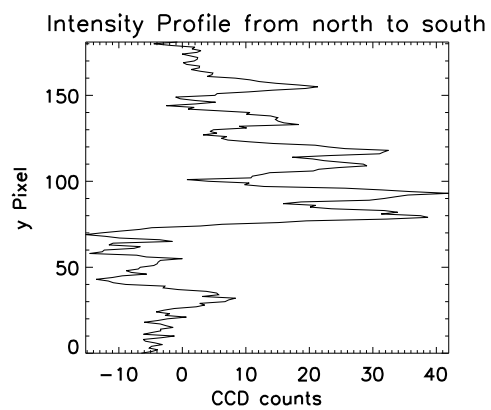
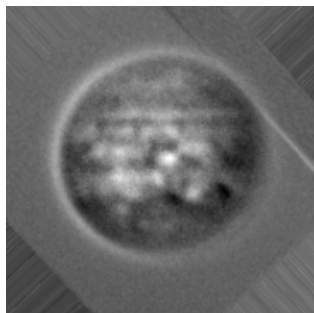
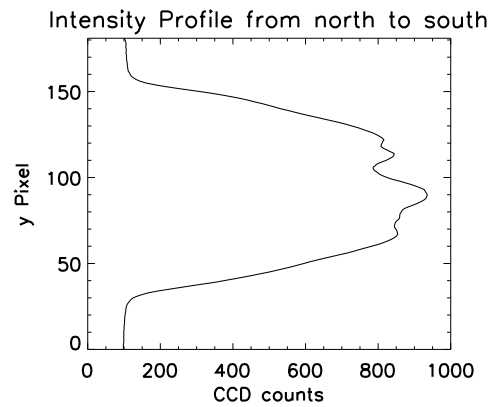
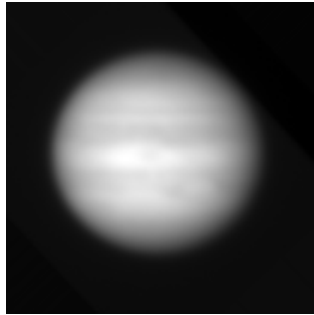


図 25: 露出 200 ms, 処理フレーム数 50.

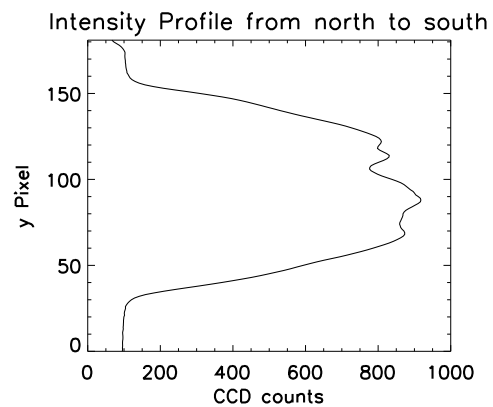
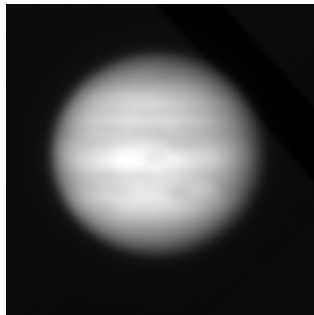
01 Nov. 2001 04:40 (CML 160 degree)

Exp. 100 ms, 200 frames (Filter FWHM 1.55 nm)

H alpha



BG (factor:0.942000)



Subtracted

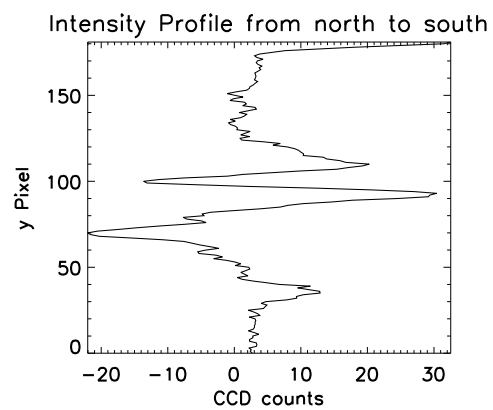
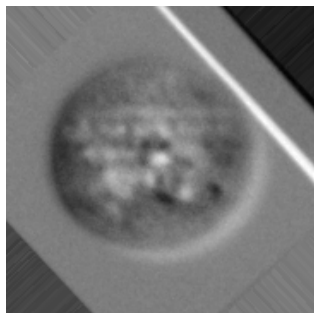
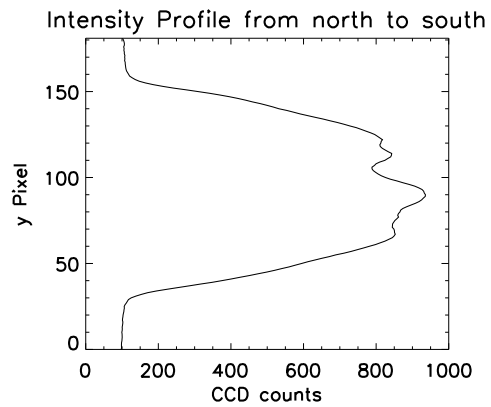
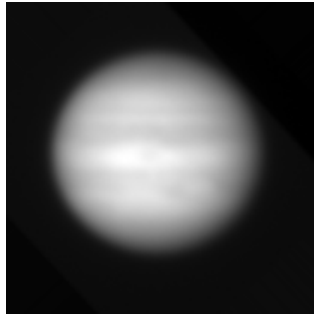


図 26: 露出 100 ms, 処理フレーム数 200.

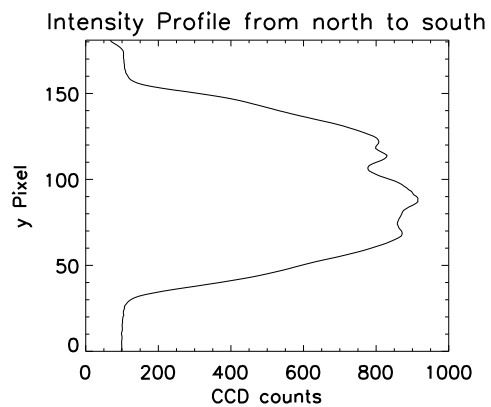
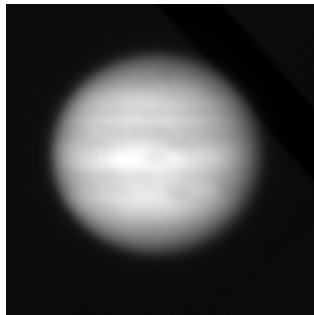
01 Nov. 2001 04:40 (CML 160 degree)

Exp. 100 ms, 100 frames (Filter FWHM 1.55 nm)

H alpha



BG (factor:0.937000)



Subtracted

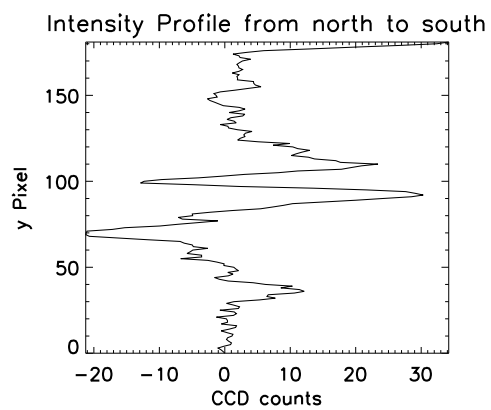
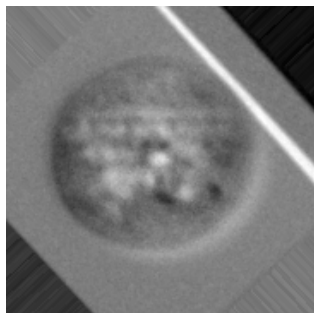
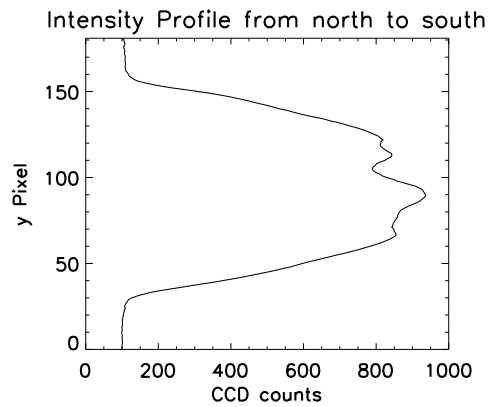
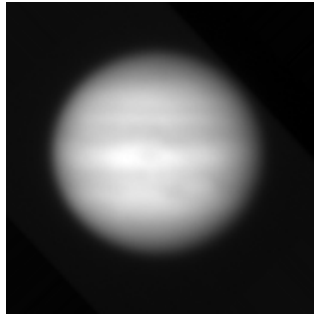


図 27: 露出 100 ms, 処理フレーム数 100.

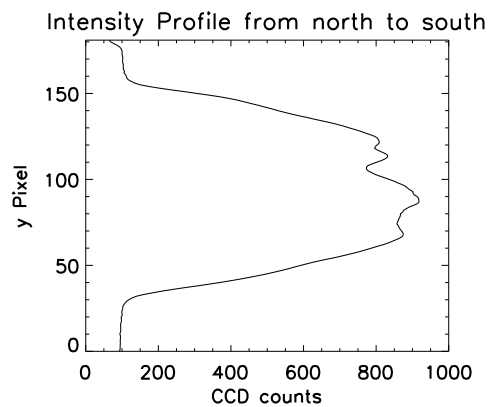
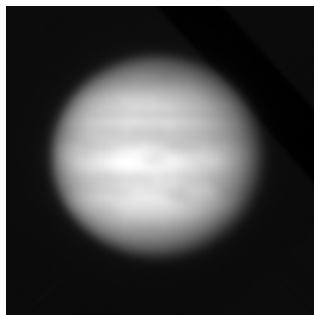
01 Nov. 2001 04:40 (CML 160 degree)

Exp. 100 ms, 50 frames (Filter FWHM 1.55 nm)

H alpha



BG (factor:0.941000)



Subtracted

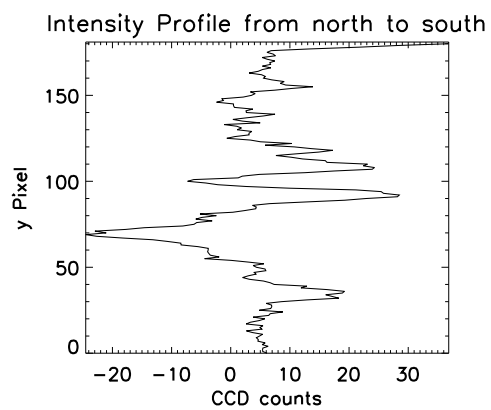
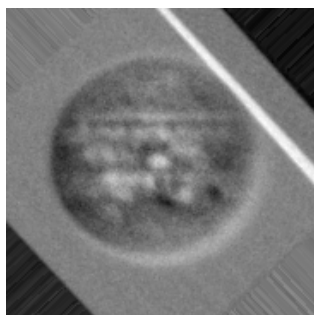


図 28: 露出 100 ms, 処理フレーム数 50.

## 5.2 考察

図 24 下段の差し引き画像において、木星北極域にオーロラオーバルによるものと考えられる発光領域が存在している。図 29 はその差し引き画像とその強度プロファイルを拡大したものである。

まずオーロラオーバルの位置について考える。図 30 の右側は図 24 下段の差し引き画像、左側は磁場モデルにより予報される観測時における木星オーロラオーバルの位置を示したものであり、南北両極の赤い線がオーロラオーバルに相当する。これは木星の VIP4 磁場モデルに従う  $30 R_J$  のフットプリントである。予報によるオーロラオーバルに比べて、処理画像にある発光領域が多少広がって見える。これは、見積もりの項で触れたように地上観測では空間分解能に限界があるため、仮にその分解能の限界を  $1-2''$  とすると、この観測システムを含めた分解能は CCD 4-5 pixel に相当する。したがって 1 pixel ほどであると見積もったオーロラオーバルの幅が、実際は数 pixel に広がっていることになる。

次に明るさについて考える。図 29 の差し引き画像は、露出 200 ms、100 フレームの重ね合わせ画像を処理したものであり、積分して 20 s 露出である。プロファイルから発光の明るさは約 10 カウントであるが、これは空間分解能の影響でオーロラオーバルが数 pixel に広がったために明るさが落ちていること考慮に入れても、見積もりと比べて小さい値である。図 24 において、 $H\alpha$  画像や BG 画像の明るさは最大でおよそ 1500 カウント/pixel ほどであり、差し引き画像の明るさはおよそ 70 カウント/pixel ほどの幅を持っている。したがって今回の解析は、バックグラウンドに対して少なくとも約 5% のシグナルを検出する精度を持っていると考えられる。実際はもう少し精度が良いということも考えられるが、オーロラによる発光はバックグラウンドに対して少なくとも 5% 以下であり、予想していたよりも非常に暗いという可能性が考えられる。結論として、比較できるデータセットが少ないため時間変動については今のところ分からないが、オーロラによる発光は予想よりも暗く、また木星可視オーロラの地上観測には、いかに観測条件の良い時にシーイングの良い画像を取得かということが重要であることが分かった。

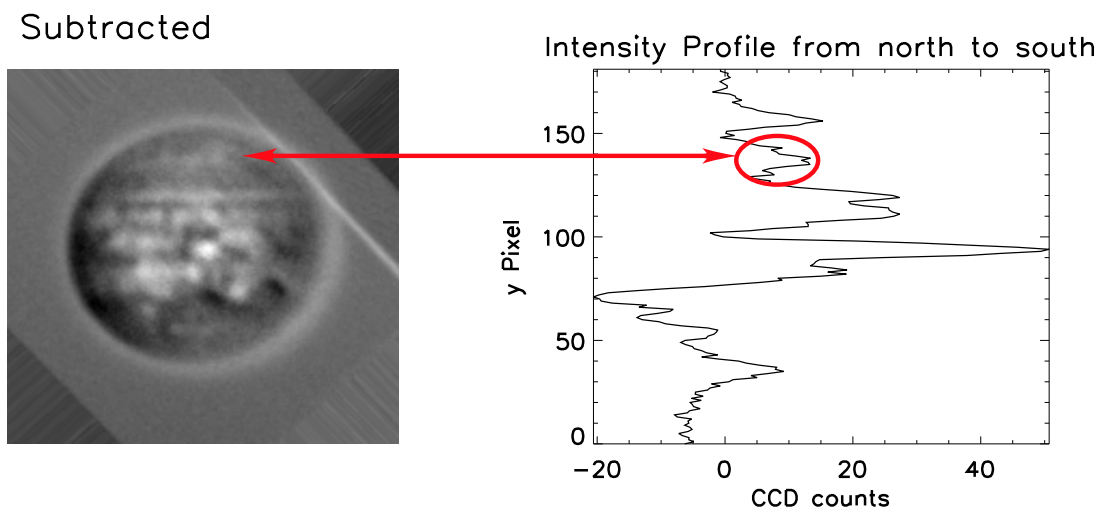


図 29: 図 24 下段の差し引き画像と強度プロファイル。



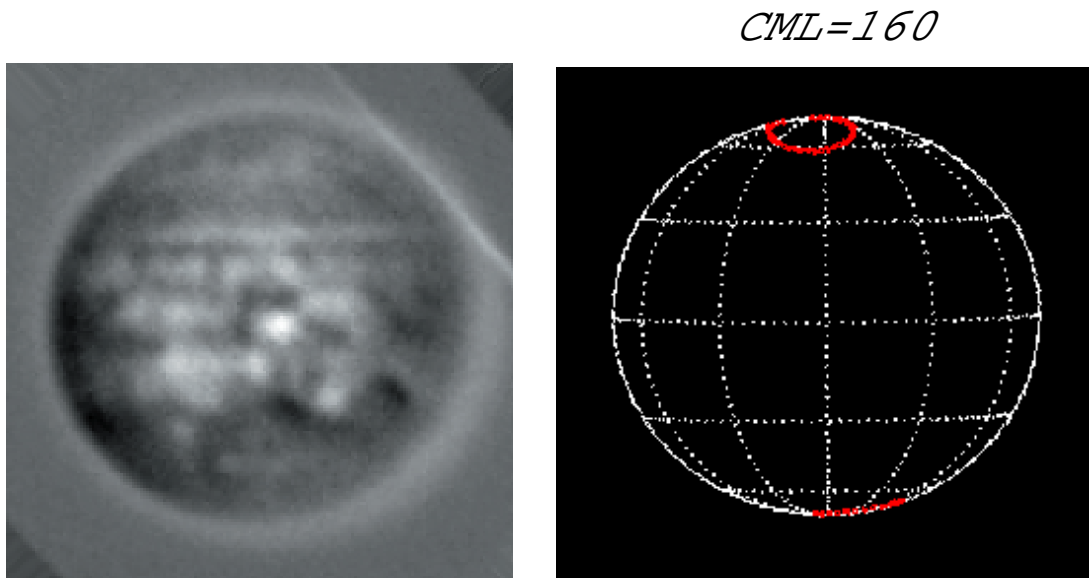


図 30: 左側が図 24 下段の差し引き画像. 右側が予想されるオーロラオーバルの位置を表した画である.

### 5.3 今後の課題

これまに行った解析より, 本研究の今後の課題として以下のことが挙げられる.

- 処理プログラムの改良.

今回のプログラムにおいて, 重ね合わせや引き算の際の, 位置合わせの精度は非常に高く, CCD 1 pixel の精度で処理できている. 今回の解析では, 差し引き画像において木星ディスクの縁に光が残っており, これはオーロラ光の検出のための処理の出来を判断する 1 つの目安になると考えられる. したがってこの縁に残った光を抑えるように処理すれば木星オーロラがより詳細に検出できるのではないかと考えている. この発生の理由としては, BG 画像の引き算の際のファクターの値による可能性と, 重ね合わせの画像の中のシーイングの良くない画像が影響している可能性とが考えられる. そのため今後の処理として, ファクターの値の調整, 重ね合わせ画像の選択についてプログラムを改良する予定である. ファクター決定については計算手順に, 木星ディスクのいくつかの領域に注目して計算するように改良する. 画像の選択については, 今回の処理ではデータセットのすべての画像をそのまま重ね合わせているが, プログラムによって画像の質を評価し, 選択的に重ね合わせるように改良する.

- 他のデータセットとの比較.

これまでに観測した他のデータについても解析を行う。今回行った解析データは短時間の観測で取得したもので、他に比較できるデータセットが少なかった。そのため、今回の観測データのさらなる解析に加えて、これまでに観測して得られたデータセットの解析も行い、世界で報告されている他波長域での木星オーロラについての研究と照らし合わせて木星可視オーロラの見積もりを行う。

- 観測システムの改良.

期待されるオーロラ光の見積もりと解析結果とを照らし合わせて、必要であれば観測システムの改良も行い、引き続き次シーズンも観測を行う。また今回の解析から、オーロラオーバルの検出には画像の質が大きく影響しており、いかにシーイングの良い画像を取得するかということが非常に重要であることが分かった。そのため小型望遠鏡を用いた観測システムを製作し、観測条件の良い場所を求めて、可能な限り観測を行いデータをことも検討している。

## 6 まとめ

木星にはオーロラが存在し, Galileo 探査機, Hubble 宇宙望遠鏡, 地上の大型赤外望遠鏡などにより, 紫外, 赤外, 可視領域での観測が行われてきたが, 可視領域は Galileo 探査機による木星夜側での観測のみであった. そのため本研究では, 高速高感度 CCD カメラ と狭帯域干渉フィルターを用いた可視光観測システムを設計・開発し, 大型望遠鏡木星可視オーロラの初の地上観測を行った. 2000 年 10 月 29 日から 1 日未明にかけて飯館観測所において観測したデータの解析から, 木星北極域において可視オーロラ光と考えられる発光を検出した. この発光は, 地上観測の空間分解能の限界のため, 磁場モデルから予報されるオーロラオーバルの位置と比較して広がった構造を示しているが, この減光を考慮に入れても見積もりから期待される明るさよりも暗いものであった.

観測を進めるなかで, 水素ランプを用いてフリッジを撮像することにより観測波長域の異なるデータを撮像し, その画像を減算処理して観測波長を検出するという新しい観測・解析手法を開発した.

また解析において, 複数の画像の位置合わせは非常に精度が高く, CCD 1 pixel 程度のマッチングに成功している. この成果は大きく, 今後木星可視オーロラ以外に, 惑星大気やその他微弱な発光を捕らえるようなさまざまな観測対象にも応用できるものだと考えている.

今後, 画像処理プログラムを改良し, 引き続き解析を行い, 木星可視オーロラの地上観測手法の確立を目指す. その後, 木星可視オーロラを連続的にモニタリングし, そのダイナミクスを観測・研究することで木星磁気圏さらには惑星磁気圏における諸物理現象の理解を深めることが目標である.

## 謝辞

望遠鏡を用いた木星可視オーロラの地上観測という非常に興味深いテーマについて研究することができ、終始丁寧に御指導していただいた渡部 重十教授に心より感謝いたします。また、観測・データ解析など研究全般についてや、学生生活に至るまで終始に渡り御指導していただいた東北大学の高橋 幸弘講師に心より感謝いたします。また、倉本 圭助教授には日々の勉強について頻繁に御指導頂きました。ここに心より感謝いたします。また観測にあたって、国内でも有数の望遠鏡を使用させていただいた北海道陸別町「銀河の森天文台」の皆様にも心より感謝いたします。また、博士論文作成のためご多忙な中、データ解析でアドバイスを頂いた東北大学の野澤 宏大氏にもここに心より感謝いたします。また、研究生活全般にわたり支援をいただいた惑星大気物理学研究室、地球流体力学研究室の皆様にも心より感謝いたします。最後に、私の研究生活を常に支えてくれている父、母、そして兄に心より感謝いたします。

## 参考文献

- Baron, R. L., T. Owen, J. E. P. Connerney, T. Sato, and J. Jarrington, 1996, Solar Wind Control of Jupiter's  $H_3^+$  Aurora, *Icarus*, 120, 437-442.
- Bhardwaj, A., and G. R. Gladston, 2000, Auroral emission of the giant planets, *Reviews of Geophysics*, 38, 295-354.
- Clary, R. S. and J. H. Hunter, 1975, Hydrogen-alpha auroral activity on Jupiter, *Astrophys. J.*, 199, 517-529.
- Cook, A. F., A. V. Jones, and D. E. Shemansky, 1981, visible Aurora in Jupiter's Atmosphere?, *J. Geophys. Res.*, 86, 8793-8796.
- Drossart, P., J.-P. Maillard, J. Caldwell, S. J. Kim, J. K. G. Watson, W. A. Majewski, J. Tennyson, S. Miller, S. K. Atreya, J. T. Clarke, J. H. Waite, and R. Wagener, 1989, Detection of  $H_3^+$  on Jupiter, *Nature*, 340, 539-541.
- Holman, B. L. and J. H. Hunter, 1977, Hydrogen-alpha auroral activity on Jupiter. II., *Astrophys. J.*, 213, 906-907.
- Hunter, J. H., 1969,  $H\alpha$  Auroral Activity on Jupiter, *Nature*, 223, 338-389.
- Ingersoll, A. P., A. R. Vasavada, B. Little, C. D. Anger, S. J. Bolton, C. Alexander, K. P. Klaasen, W. K. Tobiska, and the Galileo SSI Team, 1998, Imaging Jupiter's Aurora at Visible Wavelengths, *Icarus*, 135, 251-264.
- Mai, H and K. Jockers, 2000, Fabry-Perot Imaging of Jupiter's Aurora at 2.1  $\mu\text{m}$ , *Icarus*, 146, 494-500.
- Sato, T., J. E. P. Connerney, 1999, Jupiter's  $H_3^+$  Emissions Viewed in Corrected Jovimagnetic Coordinates, *Icarus* 141, 236-252.
- Vasavada, A. R., A. H. Bouchez, A. P. Ingersoll, B. Little, C. D. Anger, and the Galileo SSI Team, 1999, Jupiter's visible aurora and Io footprint, *J. Geophys. Res.*, 104, 27,133-27,142.
- Waite, J. H., G. R. Gladstone, W. S. Lewis, R. Goldstein, D. J. McComas, P. Riley, R. J. Walker, P. Robertson, S. Desai, J. T. Clarke, and D. T. Young, 2001, An auroral flare at Jupiter, *Nature*, 410, 787-789.